

Pengaruh ketidakseimbangan tegangan pada suplai daya listrik terhadap kecepatan putaran dan efisiensi motor induksi 3-fasa

Mutiara Zahra Kurnia^{1*}, I Made Wiwit Kastawan², Parno Raharjo³

^{1,2}Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung

³Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Kec. Parongpong, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat 40559, Indonesia

^{1*}mutiarazahrakurnia@gmail.com, ²wiwit.kastawan@polban.ac.id, ³parno.raharjo@polban.ac.id

ABSTRAK

Motor induksi 3-fasa akan beroperasi pada keadaan ideal ketika disuplai dengan sumber tegangan 3-fasa sinusoidal yang memiliki tegangan per-fasa dengan frekuensi sama, magnitudo sama serta saling berbeda fasa 120°. Namun dalam keadaan riilnya motor induksi 3-fasa seringkali beroperasi dalam kondisi tak ideal, sebagai akibat ketidakseimbangan tegangan pada suplai daya listrik yang dapat mempengaruhi unjuk kerjanya. Dalam kegiatan penelitian ini dilakukan pengujian motor induksi 3-fasa dengan dua kondisi ketidakseimbangan tegangan suplai berbeda yaitu ketidakseimbangan magnitudo serta ketidakseimbangan magnitudo dan fasa. Motor induksi 3-fasa disuplai melalui satu buah auto transformator tiga-fasa, satu buah auto transformator satu-fasa serta sebuah kapasitor daya yang dipasang pada salah satu fasa. Keadaan ketidakseimbangan magnitudo tegangan yang dibuat pada pengujian ini adalah sebesar 3%, sementara ketidakseimbangan beda fasanya adalah sebesar 2°. Hasil pengujian menunjukkan terjadinya penurunan putaran dan efisiensi pada motor induksi 3-fasa. Semakin tinggi nilai ketidakseimbangan suplai daya listriknya maka putaran dan efisiensi motor induksi 3-fasa semakin menurun. Penurunan kecepatan putaran dan efisiensi tertinggi terjadi pada kondisi ketidakseimbangan magnitudo 3% dan ketidakseimbangan beda fasa 2° dengan kondisi pembebanan 70%. Putaran nominal motor turun dari 2989 rpm ke 2953 rpm sehingga terjadi penurunan putaran sebesar 36 rpm dengan slip sebesar 1,20 %. Penurunan efisiensinya adalah sebesar 5%, turun dari 82% menjadi 77%.

Kata kunci: ketidakseimbangan tegangan, kecepatan putaran, efisiensi, motor induksi 3-fasa

ABSTRACT

A 3-phase induction motor will operate under ideal conditions when supplied by a sinusoidal 3-phase voltage source that has per-phase voltages with same frequency, same magnitude and phase difference of 120°. However, in reality a 3-phase induction motor often operate under non-ideal conditions due to supply voltage unbalance which can affect its performance. In this research, performance test for a 3-phase induction motor is carried out for two different supply voltage unbalance conditions, namely magnitude unbalance and magnitude as well as phase unbalance. The three-phase induction motor will be supplied through a three-phase autotransformer, a single-phase autotransformer, and a power capacitor connected to one phase of the supply. The magnitude of supply voltage unbalance is set at 3%, while the phase unbalance is set at 2°. Test results show decrease in rotation and efficiency of the 3-phase induction motor. The higher the supply voltage unbalance, the lower rotation and efficiency of the 3-phase induction motor. The largest decrease of rotational speed and efficiency occurs at 3% of magnitude unbalance and 2° of phase unbalance with 70% loading condition. Speed of the motor decreases from 2989 rpm in balance supply voltage condition to 2953 rpm, resulting a decrease in rotation of 36 rpm with slip of 1.20%. Decrease of motor efficiency is about 5%, it changes from 82% to 77%.

Keywords: voltage unbalance, rotation, efficiency, 3-phase induction motor

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di Indonesia terjadi dengan sangat pesat, salah satunya pada bidang industri. Kini hampir semua sektor industri menggunakan alat bantu untuk menunjang proses dan hasil produksinya, seperti penggunaan motor induksi 3-fasa sebagai penggerak utama. Motor induksi merupakan perangkat konversi energi elektromekanik yang digunakan pada berbagai industri untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor induksi dapat dikatakan beroperasi dalam

kondisi ideal jika disuplai dengan sumber tegangan tiga-fasa sinusoidal yang memiliki tegangan per-fasa dengan frekuensi sama, magnitudo sama serta saling berbeda fasa 120° (dikenal dengan istilah tegangan 3-fasa seimbang) [1]. Motor induksi yang diberi tegangan suplai 3-fasa seimbang akan menghasilkan arus 3-fasa seimbang pada setiap belitan fasa statornya dan fluksi/medan putar yang seimbang juga [2].

Saat beroperasi, motor induksi 3-fasa sering kali mengalami kondisi tidak ideal yang dapat mempengaruhi atau menurunkan unjuk kerjanya. Kondisi operasi yang tidak ideal ini diakibatkan oleh dua faktor utama yaitu mekanikal dan elektrik. Kajian beberapa pustaka referensi menunjukkan faktor-faktor mekanikal yang dapat mempengaruhi unjuk kerja motor induksi 3-fasa. Kondisi *mechanical imbalance* dapat mengakibatkan peningkatan vibrasi arah radial pada motor AC 3-fasa. Analisis spektrumnya menunjukkan bahwa vibrasi ini memiliki frekuensi yang sama dengan kecepatan putaran motor [3]. Sementara itu, permasalahan *misalignment* dan poros bengkok akan membangkitkan vibrasi pada arah radial dan aksial motor AC 3-fasa. Analisis spektrumnya menunjukkan bahwa vibrasi akibat misalignment dan poros bengkok memiliki frekuensi yang sama dengan kecepatan putaran motor atau kelipatannya [3]. Untuk motor AC 3-fasa yang mengalami kerusakan pada bearing akan mengalami peningkatan vibrasi pada arah radial dan aksial dengan karakteristik vibrasi terjadi pada frekuensi sangat tinggi [3].

Sementara itu, salah satu faktor elektrik yang dapat mengakibatkan motor induksi bekerja dalam kondisi tidak ideal adalah terjadinya ketidakseimbangan tegangan pada suplai daya listriknya. Ketidakseimbangan tegangan suplai merupakan kondisi pada sistem kelistrikan tiga-fasa dimana tegangan per-fasanya memiliki magnitudo berbeda dan/atau beda fasa yang tidak sama [4]. Hasil kajian dari beberapa literatur menunjukkan dampak buruk ketidakseimbangan tegangan suplai terhadap sistem kelistrikan dan komponen-komponen di dalamnya. Ketidakseimbangan tegangan suplai dapat mengakibatkan meningkatnya temperatur kerja, munculnya pulsasi torka, meningkatnya vibrasi dan *noise* serta berkurangnya faktor daya motor AC tiga-fasa [5]. Kajian lainnya menunjukkan bahwa ketidakseimbangan tegangan dapat mengakibatkan pergeseran titik kerja transformator daya untuk menghasilkan efisiensi maksimum serta mengakibatkan penurunan efisiensi yang signifikan pada titik-titik kerja tersebut apabila ketidakseimbangan magnitudo tegangannya melampaui 3% [6]. Lebih lanjut, ketidakseimbangan tegangan suplai dapat mengurangi pembentukan medan putar pada stator, meningkatkan vibrasi pada bearing dan meningkatkan temperatur pada belitan motor induksi tiga-fasa [7], [17], [18]. Faktor elektrik lainnya yang dapat mengakibatkan motor induksi bekerja dalam kondisi tidak ideal adalah harmonisa arus dari suplai daya tiga-fasanya. Permasalahan harmonisa terutama dijumpai pada motor induksi 3-fasa yang disuplai dengan penggerak kecepatan variabel (*variable speed drive*, disingkat VSD) ataupun *soft-starter* [8]. Penggunaan VSD pada motor induksi 3-fasa dapat membantu upaya konservasi energi yang berujung pada peningkatan efisiensinya [9]. Namun, penggunaan VSD ini mengakibatkan munculnya harmonisa frekuensi tinggi pada arus suplai motor [10]. Munculnya harmonisa arus ini akan mengakibatkan berbagai dampak buruk terhadap sistem suplai daya listrik dan peralatan-peralatan yang ada didalamnya seperti kapasitor daya yang banyak digunakan untuk keperluan kompensasi daya reaktif [19], transformator daya serta motor induksi 3-fasa itu sendiri. Harmonisa dapat mempengaruhi unjuk kerja kapasitor sebagai akibat berkurangnya nilai reaktansi kapasitor pada frekuensi tinggi. Adapun pada motor induksi tiga-fasa, harmonisa dapat berakibat pada meningkatnya rugi-rugi belitan motor yang berujung pada menurunnya efisiensi motor listrik. Sementara itu, harmonisa pada transformator akan berakibat pada meningkatnya rugi-rugi inti dan rugi-rugi belitan transformator yang bermuara pada menurunnya efisiensi transformator [11]-[13].

Dengan mempertimbangkan bahwa kondisi ketidakseimbangan tegangan kerap dijumpai dalam sistem suplai daya listrik, termasuk sistem suplai daya listrik untuk motor induksi 3-fasa, maka dalam kegiatan penelitian ini akan dilakukan kajian mengenai pengaruh ketidakseimbangan tegangan suplai terhadap unjuk kerja motor induksi 3-fasa ditinjau dari sisi kecepatan putaran dan efisiensinya.

2. METODE PENELITIAN

Pengaruh ketidakseimbangan tegangan suplai terhadap unjuk kerja motor induksi 3-fasa dilihat dari putaran dan efisiensinya dalam kegiatan penelitian ini akan dikaji berdasarkan data uji laboratorium. Metode eksperimental ini dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Listrik, Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung. Selanjutnya data uji laboratorium yang diperoleh dianalisis dengan metode komparatif dengan membandingkan kecepatan putaran dan efisiensi motor induksi tiga-fasa pada tiga kondisi tegangan suplai berbeda yaitu seimbang, ketidakseimbangan hanya pada magnitudo tegangannya sebesar 3% serta ketidakseimbangan pada magnitudo tegangan 3% dan beda fasa 2°. Untuk masing-masing kondisi tegangan suplai ini dilakukan tiga kondisi pembebanan berbeda yaitu 0% (beban nol), 50% (setengah dari kapasitas daya motor), dan 70% (0,7 dari kapasitas daya motor) dengan mempertimbangan kemungkinan kenaikan temperatur pada motor induksi 3-fasa yang dapat melampaui temperatur kerja yang diijinkan. Motor induksi tiga-fasa yang diuji merupakan motor induksi tiga-fasa rotor sangkar yang tersedia di Laboratorium Konversi Energi Listrik, Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung seperti ditunjukkan oleh Gambar 1. Motor induksi 3-fasa ini memiliki spesifikasi seperti ditunjukkan oleh Tabel 1.

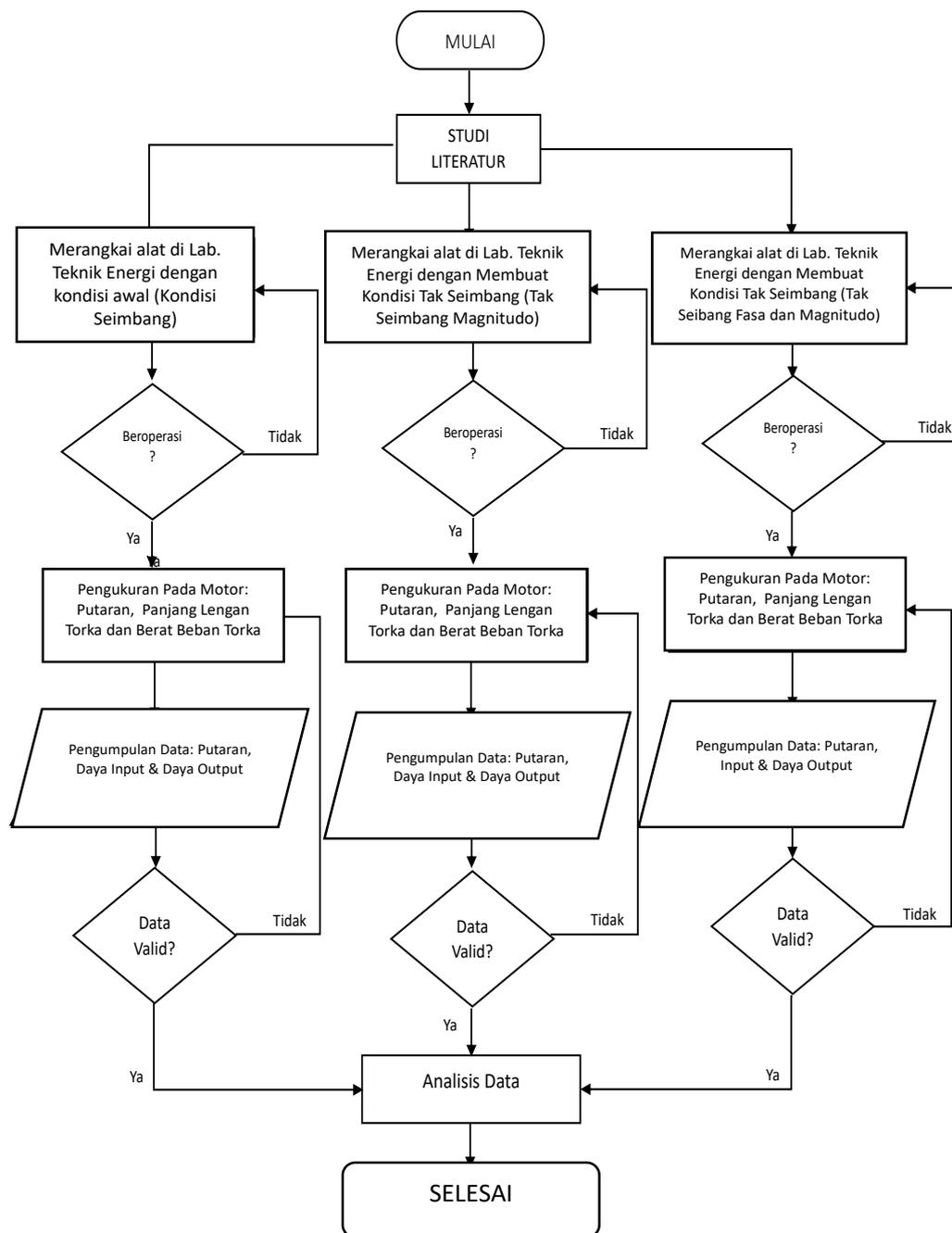


Gambar 1. Motor induksi 3-fasa rotor sangkar sebagai objek penelitian

Tabel 1. Spesifikasi motor induksi 3-fasa sebagai objek penelitian

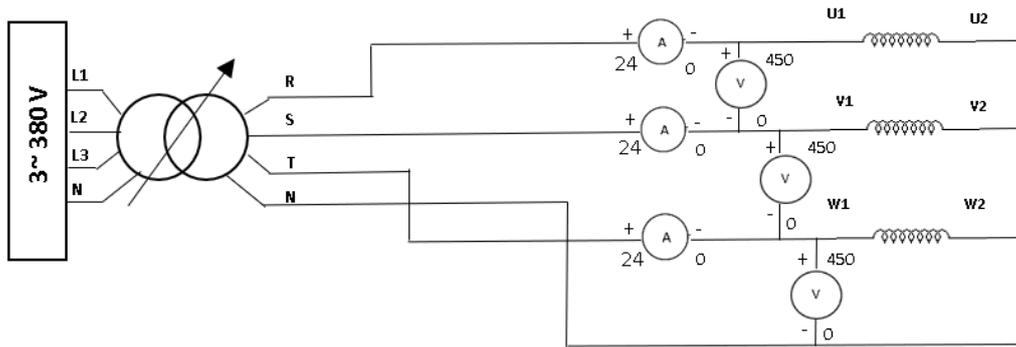
Spesifikasi	Keterangan
<i>Type</i>	DL 2050/S
<i>Rated Voltage</i>	220/380V
<i>Rated Current</i>	20,18/12A
<i>Rated Speed</i>	2900 rpm
<i>Rated Power</i>	5,5 kW
<i>Frequency</i>	50 Hz
<i>Cos Phi (faktor daya)</i>	0,89
<i>Service Factor</i>	1,00

Secara lebih detail, langkah-langkah kerja yang dilakukan dalam kegiatan penelitian ini adalah sebagaimana ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 2.

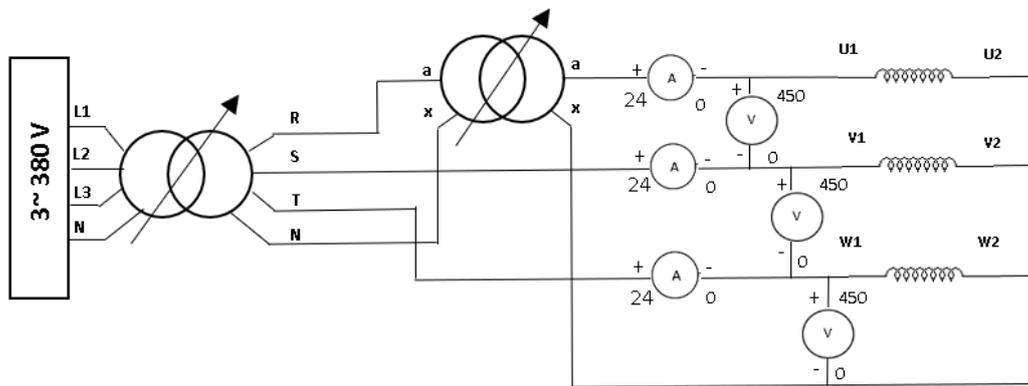


Gambar 2. Diagram alir kegiatan penelitian

Adapun diagram satu garis yang menunjukkan rangkaian motor induksi 3-fasa, suplai daya listrik 3-fasa dan alat-alat ukur yang digunakan dalam uji laboratorium adalah sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Diagram satu garis pengujian motor induksi 3-fasa untuk kondisi seimbang



Gambar 4. Diagram satu garis pengujian motor induksi 3-fasa untuk kondisi ketidakseimbangan tegangan

Catatan: pada pengujian untuk keadaan ketidakseimbangan pada magnitudo dan beda fasa tegangan suplai diberikan penambahan kapasitor pada keluaran autotransformator satu-fasa.

2.1 Ketidakseimbangan Tegangan (*Voltage Unbalance*)

Ketidakeimbangan tegangan (*voltage unbalance*, $V_{unbalance}$) merupakan suatu deviasi maksimum atau deviasi dari nilai rata-rata tegangan atau arus listrik dari sistem 3-fasa, dibagi dengan nilai rata-rata tegangan atau arus 3-fasa dan dinyatakan sebagai persentase [14].

$$\%V_{unbalance} = \frac{V_{line\ tertinggi} - V_{rata-rata}}{V_{rata-rata}} \times 100\% \quad (1)$$

Cara membuat kondisi ketidakseimbangan pada magnitudo dan beda fasa dari tegangan suplai daya listrik yang masuk ke motor induksi 3-fasa adalah dengan memasang kapasitor daya di sisi masukan motor atau disisi keluaran dari autotransformator 1-fasa [15].

2.2 Kecepatan Putaran

Kecepatan putaran motor induksi akan semakin menurun seiring bertambahnya beban yang diberikan pada motor. Tegangan terinduksi pada rotor akan timbul karena adanya perpotongan batang konduktor (rotor) dengan medan putar stator. Oleh karenanya diperlukan perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (N_s) dengan kecepatan rotor (N_r) yang disebut dengan istilah slip (s) [1].

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \quad (2)$$

2.3 Efisiensi Motor Induksi 3-Fasa

Motor induksi tidak memiliki sumber tegangan yang langsung dihubungkan ke rotor, sehingga daya yang melalui celah udara adalah sama dengan daya yang disuplai ke rotor. Daya akan dialirkan/ditransfer melalui celah udara, kemudian daya yang ditransfer ke rotor akan dikonversikan menjadi daya mekanik. Efisiensi motor (η_{motor}) merupakan suatu perbandingan antara daya keluaran motor (P_{out}) terhadap daya masukan pada terminalnya (P_{in}). Nilai efisiensi motor bergantung pada besarnya rugi-rugi (P_{rugi}) yang umumnya terdiri dari rugi belitan, rugi inti dan rugi mekanik motor [1].

$$\eta_{motor}(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{P_{in} - P_{rugi}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

Daya keluaran motor dapat juga dihitung secara langsung berdasarkan putaran rotor dan torka (T_m) yang dibangkitkan sesuai persamaan:

$$P_{out} = \frac{60 T_m}{2\pi N_r} \quad (4)$$

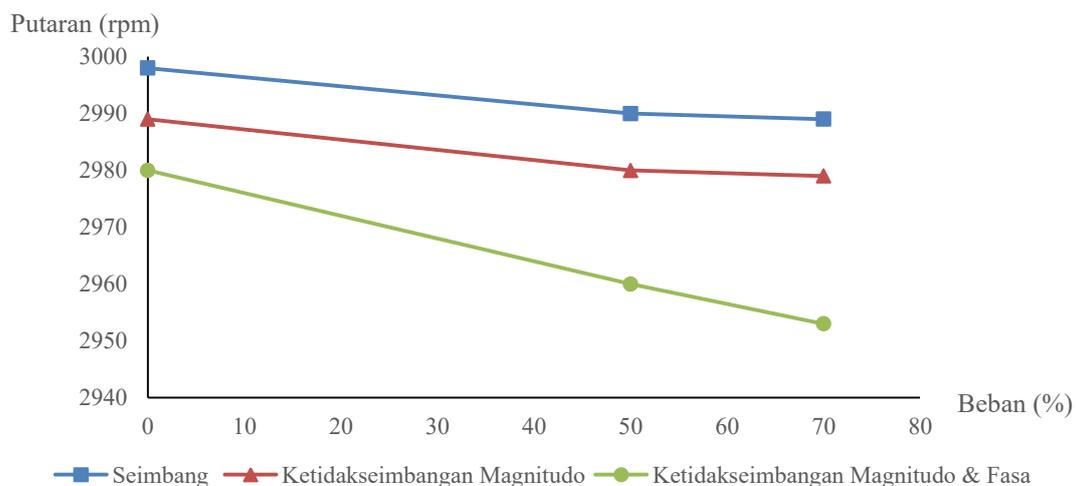
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan Suplai Terhadap Putaran Motor Induksi 3-Fasa

Dari uji laboratorium yang telah dijalankan yang diikuti dengan proses pengolahan data dengan mengacu pada rumus (2) maka dapat diperoleh perbandingan karakteristik putaran motor induksi 3-fasa untuk tiga kondisi suplai tegangan masukan listrik berbeda yaitu seimbang, ketidakseimbangan magnitudo 3% serta ketidakseimbangan magnitudo 3% dan beda fasa 2° sebagaimana ditunjukkan oleh Tabel 2 dan Gambar 5.

Tabel 2. Putaran motor induksi 3-fasa untuk kondisi suplai tegangan masukan listrik yang berbeda

Pembebanan motor (% terhadap kapasitas daya)	Seimbang	Ketidakseimbangan magnitudo 3%			Ketidakseimbangan magnitudo 3% dan beda fasa 2°		
	Putaran (rpm)	Putaran (rpm)	Selisih putaran (rpm)	Slip (%)	Putaran (rpm)	Selisih putaran (rpm)	Slip (%)
0	2998,0	2989,0	9,0	0,30%	2980,0	18,0	0,60%
50	2990,0	2980,0	10,0	0,33%	2960,0	30,0	1,00%
70	2989,0	2979,0	10,0	0,33%	2953,0	36,0	1,20%



Gambar 5. Grafik putaran motor induksi 3-fasa untuk kondisi suplai tegangan masukan listrik yang berbeda

Dari data pada Tabel 2 dan grafik pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa ketidakseimbangan tegangan suplai berpengaruh terhadap penurunan putaran motor induksi 3-fasa. Pada kondisi tegangan suplai seimbang, putaran motor AC 3-fasa tercatat mendekati putaran nominal/sinkronnya (3000 rpm). Penambahan beban motor mengakibatkan penurunan putaran, namun penurunannya tidak terlalu besar. Ketika motor disuplai dengan tegangan 3-fasa yang tidak seimbang maka putaran motor menurun lebih dalam dibandingkan saat disuplai dengan tegangan 3-fasa seimbang. Kondisi ketidakseimbangan tegangan yang lebih buruk (tidak seimbang secara magnitudo dan fasa) akan menghasilkan penurunan putaran motor AC 3-fasa yang lebih besar. Lebih lanjut, serupa dengan kondisi saat motor disuplai dengan tegangan tiga-fasa seimbang, penambahan beban motor akan mengakibatkan penurunan putaran. Penurunan putaran motor ini bersifat linear yang diakibatkan adanya slip saat motor beroperasi. Berdasarkan data pengujian, penurunan kecepatan putaran tertinggi terjadi pada keadaan ketidakseimbangan magnitudo 3% dan beda fasa sebesar 2° untuk pembebanan terbesar (70%) yaitu berkurang dari 2989 rpm (putaran nominal motor pada keadaan seimbang) ke 2953 rpm. Terjadi perbedaan putaran sebesar 36 rpm dengan slip sebesar 1,20%.

3.2 Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan Suplai Terhadap Efisiensi Motor Induksi 3-Fasa

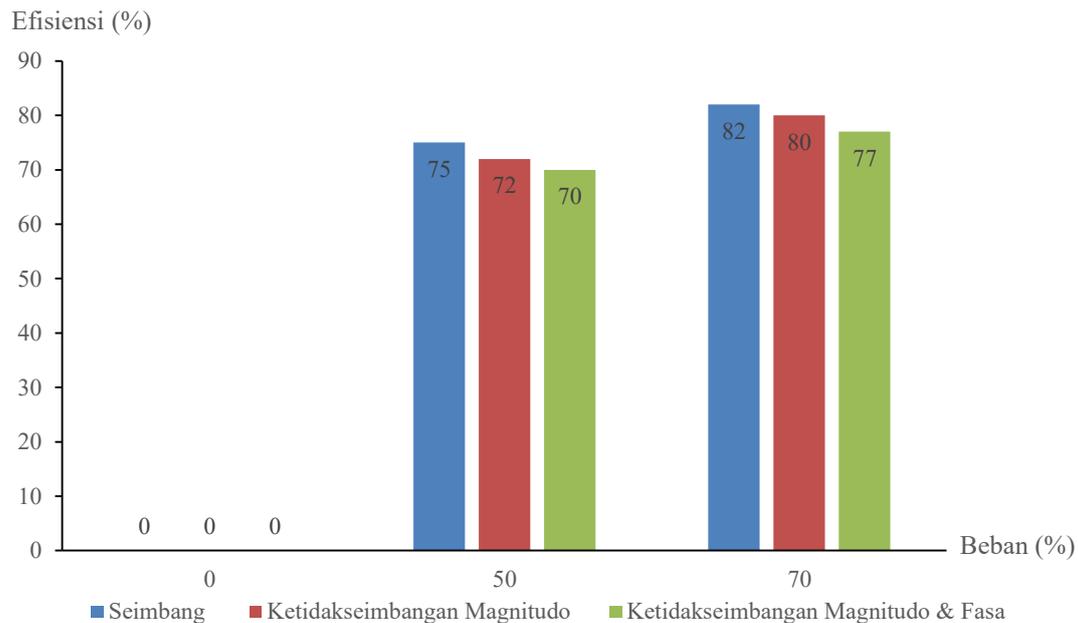
Untuk melihat pengaruh ketidakseimbangan tegangan suplai daya listrik terhadap efisiensi motor induksi tiga-fasa maka dilaksanakan pengukuran terhadap torka yang dibangkitkan serta daya input untuk beberapa kondisi pembebanan motor. Tabel 3 di bawah menampilkan data torka dan daya input motor dimaksud. Selanjutnya, dengan menggunakan rumus (3) dan (4) data pada Tabel 3 dapat diolah untuk menghasilkan nilai efisiensi ditampilkan oleh Tabel 4. Untuk melihat lebih jelas perbandingan karakteristik efisiensi motor induksi tiga-fasa untuk tiga kondisi suplai tegangan masukan listrik berbeda yaitu seimbang, ketidakseimbangan magnitudo 3% serta ketidakseimbangan magnitudo 3% dan beda fasa 2° maka dibuat grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 6.

Tabel 3. Torka dan daya input motor induksi 3-fasa untuk kondisi suplai tegangan masukan listrik yang berbeda

Pembebanan motor (% terhadap kapasitas daya)	Seimbang		Ketidakseimbangan magnitudo 3%		Ketidakseimbangan magnitudo 3% dan beda fasa 2°	
	Torka (Nm)	Daya input (kW)	Torka (Nm)	Daya input (kW)	Torka (Nm)	Daya input (kW)
0	0,0	0,5	0,0	1,7	0,0	1,7
50	6,0	2,5	1,8	2,5	5,6	2,5
70	8,9	3,4	2,7	3,5	8,8	3,5

Tabel 4. Efisiensi motor induksi 3-fasa untuk kondisi suplai tegangan masukan listrik yang berbeda

Pembebanan motor (% terhadap kapasitas daya)	Seimbang	Ketidakseimbangan magnitudo 3%		Ketidakseimbangan magnitudo 3% dan beda fasa 2°	
	Efisiensi (%)	Efisiensi (%)	Selisih efisiensi (%)	Efisiensi (%)	Selisih efisiensi (%)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50	75,0	72,0	3,0	70,0	5,0
70	82,0	80,0	2,0	77,0	5,0



Gambar 6. Grafik perbandingan efisiensi motor induksi 3-fasa untuk kondisi suplai tegangan masukan listrik yang berbeda

Motor induksi 3-fasa akan beroperasi dalam kondisi ideal ketika tegangan yang masuk ke dalam motor seimbang, dimana tegangan per-fasanya memiliki frekuensi sama, magnitudo sama, saling berbeda fasa 120° dan bentuk gelombang sinusoidal murni [1]. Sehingga unjuk kerja motor induksi tiga-fasa akan dipengaruhi oleh besar ketidakseimbangan tegangan yang masuk ke dalam motor. Berdasarkan data dalam Tabel 4 dan grafik dalam Gambar 6 terlihat bahwa secara umum untuk kondisi seimbang, ketidakseimbangan magnitudo serta ketidakseimbangan magnitudo dan fasa akan terjadi peningkatan efisiensi motor induksi ketika bebannya semakin meningkat. Akan tetapi ketika motor induksi 3-fasa diberi tegangan suplai yang tidak seimbang dari sisi magnitudo maka nilai efisiensinya akan menurun jika dibandingkan efisiensi motor saat diberi tegangan suplai seimbang. Penurunan efisiensinya akan semakin besar jika motor diberi tegangan suplai dengan kondisi ketidakseimbangan yang lebih besar (ketidakseimbangan magnitudo dan beda fasa). Nilai efisiensi motor pada keadaan ketidakseimbangan magnitudo dan beda fasa akan lebih kecil lagi jika dibandingkan nilai efisiensi motor pada kondisi ketidakseimbangan magnitudo. Hal tersebut terjadi karena ketidakseimbangan tegangan akan menghasilkan medan putar magnet yang tidak merata yang berakibat pada rendahnya torka yang dapat dibangkitkan oleh motor. Nilai torka yang rendah berpengaruh terhadap penurunan daya output motor pada daya input yang tetap [16]. Semakin besar ketidakseimbangan tegangan suplai motor akan menghasilkan medan putar magnet yang semakin tidak merata. Dari hasil pengolahan data pengujian dapat terlihat bahwa rentang penurunan efisiensi motor tertinggi sebesar 5% terjadi pada ketidakseimbangan magnitudo dan beda fasa dengan pembebanan 70%. Efisiensi motor berkurang menjadi 77% dari nilai efisiensi motor semula pada keadaan seimbang sebesar 82%.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian yang telah diberikan dapat disimpulkan bahwa kecepatan putaran motor induksi 3-fasa akan menurun seiring bertambahnya beban dan bertambahnya ketidakseimbangan tegangan suplai daya listrik masukan. Sementara itu, efisiensi motor induksi 3-fasa akan semakin meningkat seiring bertambahnya pembebanan motor. Namun, efisiensi motor induksi 3-fasa akan bernilai lebih rendah apabila ketidakseimbangan tegangan suplai daya listrik masukan semakin bertambah. Dari hasil pengujian, penurunan kecepatan putaran dan efisiensi motor tertinggi terjadi pada ketidakseimbangan magnitudo 3% dan beda fasa 2° dengan pembebanan 70%. Putaran motor

induksi 3-fasa berkurang dari putaran nominal 2989 rpm saat disuplai dengan tegangan masukan seimbang menjadi 2953 rpm saat disuplai dengan tegangan masukan yang memiliki ketidakseimbangan magnitudo 3% dan beda fasa 2° sehingga terjadi perbedaan putaran sebesar 36 rpm dengan slip sebesar 1,20%. Penurunan efisiensinya adalah sebesar 5%, dari 82% saat disuplai dengan tegangan masukan seimbang menjadi 77% saat disuplai tegangan masukan yang memiliki ketidakseimbangan magnitudo 3% dan beda fasa 2°.

REFERENSI

- [1] B. L. Theraja, A. K. Theraja, *A Textbook of Electrical Technology in SI Units Volume II AC and DC Machines*, S. Chand Publisher, 2013.
- [2] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals 5th Edition*, McGraw-Hill, 2012.
- [3] New Zealand Support for Training in Geothermal Support (NZSTIGS), *Fundamentals of Vibration Analysis (Short Course Manual)*, 2021.
- [4] K. S. Sandhu and V. Chaudhary, "Simulations of Three-Phase Induction Motor Operating with Voltage Unbalance, National Institute of Technology Kurukshetra, India, 2008.
- [5] S. Singh and A. Srivastava, "Voltage Unbalance and Its Impact on the Performance of Three Phase Induction Motor: A Review," *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, vol. 7, no. 7, 2019.
- [6] N. X. Cuong, L. A. Tuan, and D. Nhu, "Effect of Voltage Unbalances on the Performance of a Three-phase Transformer," *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2022.
- [7] E. Quispe, G. Gonzales, and J. Aguado, "Influence of Unbalanced and Waveform Voltage on the Performance Characteristics of Three-phase Induction Motors," *Renewable Energy & Power Quality Journal*, 2004.
- [8] M. H. Rashid, *Power Electronics Devices, Circuits & Applications 4/E*, 2014.
- [9] R. Saidur, "Applications of Variable Speed Drive in Electrical Motor Energy Savings," *Elsevier: Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011.
- [10] I. M. Amir and A. I. Firdaus, "Study of Analysis of Harmonic Effects Due to the Use of Variable Speed Drive in Three Phase Induction Motors," *Tugas Akhir Politeknik Negeri Bandung*, 2017.
- [11] R. Pinyol, *Harmonics: Causes, Effects and Minimization*, Barcelona: Salicru, 2011.
- [12] M. Davudi, S. Torabzad, and B. Ojaghi, "Analysis of Harmonics and Harmonics Mitigation Methods in Distribution System," *Australian Journal of Basic and Applied Science*, vol. 5, pp. 996-1005, 2011.
- [13] M. A. Patel, A. R. Patel, D. R. Vyas, and K. M. Patel, "Use of PWM Techniques for Power Quality Improvement," *International Journal of Recent Trends in Engineering*, vol. 1, no. 4, May 2009.
- [14] C. R. Dugan, *Electrical Power System Quality*, New York: McGraw-Hill, 2004.
- [15] N. Harpawi, "Analisis Pengaruh Pemasangan Mini Capacitor Bank Terhadap Kualitas Listrik Rumah Tangga Serta Perancangan Filter Aktif Menggunakan Kontroller Pi Sebagai Pelindung Kapasitor Dari Harmonisa" *Tugas Akhir Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*, 2010.
- [16] Y. Ching, B. K. Chen, W. J. Lee, and Y. F. Hsu, "Effects of Various Unbalanced Voltages on The Operation Performance of An Induction Motor Under The Same Voltage Unbalance Factor Condition," *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, 1997.
- [17] Nema Std, Motor and Generator Part 14.36, Effect of Unbalanced Voltage on Performance of Polyphase Induction Motor, Publication MG I – 1998 (Revision 3, 2002).
- [18] A. Makarim, T. Sukmadi, and B. Winardi, Analisis Ketidakseimbangan Tegangan dan Kenaikan Suhu Pada Motor Induksi 3 Fasa Akibat Gangguan Single-Phasing, *Transmisi*, 2016.
- [19] S. Bhattacharyya, A. Choudhury, and H. R. Jariwala, "Case Study on Power Factor Improvement," *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, vol. 3, no. 12, pp. 8372-8378, 2011.

